

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2000-329953
 (43)Date of publication of application : 30.11.2000

(51)Int.Cl. G02B 6/12
 G02B 6/13

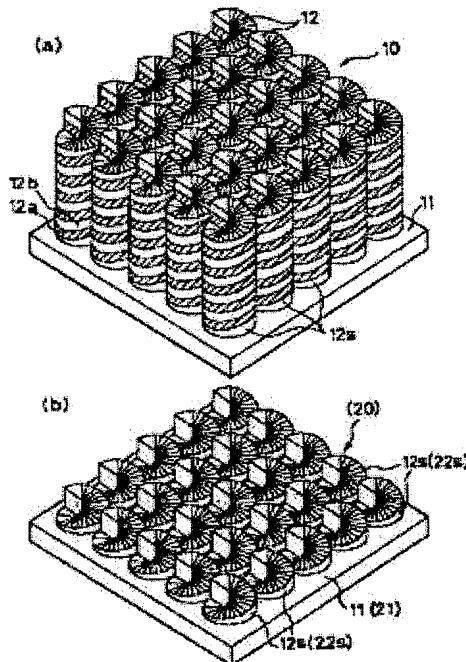
(21)Application number : 11-139423 (71)Applicant : NIPPON TELEGR & TELEPH CORP
 <NTT>
 (22)Date of filing : 20.05.1999 (72)Inventor : NOTOMI MASAYA
 ISHII TETSUYOSHI
 TAMAMURA TOSHIAKI

(54) PHOTONIC CRYSTAL AND ITS MANUFACTURE

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a photonic crystal which has a crystal structure having optical rotating power like in the case of a right quartz crystal and a left quartz crystal as right-hand and left-hand symmetricalness is collapsed, is applicable as a linear polarizer and has photonic band gaps and the optical rotating power and a process for manufacturing the same.

SOLUTION: This crystal is two-dimensionally arrayed with columnar bodies 12 continuously and helically connected with the same material portions constituted by helically forming at least two kinds of the material portions 12a and 12b varying in refractive indices on a substrate 11. This process is for manufacturing the photonic crystal which is two-dimensionally arrayed with the columnar bodies 12 continuously and helically connected with the same material portions constituted by helically forming at least two kinds of the material portions 12a and 12b varying in the refractive indices on the substrate 11. After a stage (A) of forming the first helical first stage portions 12s on the substrate 11 and two-dimensionally arraying the same, a stage (B) of alternately laminating at least two kinds of the material portions 12a and 12b varying in the refractive indices successively by the first helical one stage portion 12s each on the first helical one stage portions 12s is repetitively executed.



* NOTICES *

JPO and INPIT are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1. This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
2. *** shows the word which can not be translated.
3. In the drawings, any words are not translated.

CLAIMS

[Claim(s)]

[Claim 1]A photonic crystal carrying out two-dimensional array of the columnar body with which an identical material portion which forms spirally at least two kinds of material portions from which a refractive index differs on a substrate was connected spirally continuously.

[Claim 2]It is a manufacturing method of a photonic crystal which carried out two-dimensional array of the columnar body with which an identical material portion which forms spirally at least two kinds of material portions from which a refractive index differs on a substrate was connected spirally continuously, A manufacturing method of a photonic crystal carrying out to a top for said the first one step of spiral by repeating a process (B) which makes at least two kinds of material portions from which a refractive index differs every one step of spiral laminate one by one alternately after a process (A) of forming and carrying out two-dimensional array of the first one step of spiral on a substrate.

[Claim 3]Said process (B) holding shape which carried out two-dimensional array on a substrate in said process (A) by bias weld slag. A manufacturing method of the photonic crystal according to claim 2 being a thing which makes at least two kinds of material portions from which said refractive index differs every one step of spiral laminate one by one alternately.

[Claim 4]On other different substrates from a substrate which produces a photonic crystal, said process (A) carries out two-dimensional array of the 1 step of spiral shape equivalent to a part for said the first one step of spiral, and uses other substrates as a force piston, It is what transfers and carries out two-dimensional array of said the first one step of spiral on said substrate by forcing said force piston on a thin film formed on said substrate, In every one step of spiral, said process (B) applies at least two kinds of materials in which refractive indices differ one by one, and forms a thin film in a top for said the first one step of spiral, A manufacturing method of the photonic crystal according to claim 2 being a process which transfers said 1 step of spiral shape by said force piston, and is made for every one step of spiral to laminate one by one whenever it forms a thin film for one step of this spiral.

[Claim 5]By performing electron-beam-lithography exposure and changing an exposure dose by a place on said resist during this exposure, after applying resist on said substrate, or a substrate besides the above. A resist pattern for producing a part for said the first one step of spiral and said 1 step of spiral shape is formed, A manufacturing method of a photonic crystal given in the first paragraph of either Claim 2 thru/or Claim 4 carrying out two-dimensional array of said the first one step of spiral on said substrate based on this resist pattern, or carrying out two-dimensional array of said 1 step of spiral shape on a substrate besides the above.

[Translation done.]

* NOTICES *

JPO and INPI are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.

2.**** shows the word which can not be translated.

3.In the drawings, any words are not translated.

DETAILED DESCRIPTION

[Detailed Description of the Invention]

[0001]

[Field of the Invention]This invention relates to a photonic crystal which is the basic structure which constitutes various Optical Devices Division, such as laser used for optical information processing, optical transmission, etc., an optical waveguide, and an optical integrated circuit, and a manufacturing method for the same.

[0002]

[Description of the Prior Art]In three-dimensional dielectric periodical structure, light receives

periodic perturbation, the dispersion relation of the frequency takes the band structure of the electron under crystal, and the same band structure, and such dielectric periodical structure is called the photonic crystal (Photonic Crystal). Since propagation of the light in a photonic crystal is determined by band structure, it can design the optical property freely by controlling the size of a crystal structure or periodic perturbation. For example, if a photonic crystal enlarges the refractive index ratio between the materials which constitute a photonic crystal and periodical structure is selected appropriately, it will demonstrate powerful optical confinement ability etc. Application for a super-high-density optical integrated circuit or a super-efficient light element is expected from this photonic crystal.

[0003]The usefulness of a photonic crystal in 1987 by Yablonovitch. By indication (E. Yablonovitch, Phys.Rev.Lett.58-2059 (1987)) that light can be thoroughly shut up using the photonic crystal (photonic band gap material) which the band gap opened in three dimensions. Although observed [came], a photonic crystal of those days is the structure where a millimeter cycle is big.

It was operated and evaluated using electromagnetic waves with long wavelength (microwave etc.).

However, the wavelength area of the light used, for example by optical communications etc. is 1-1.5 micrometers, and in order to operate a photonic crystal in this wavelength area, it needs to make the cycle of a photonic crystal smaller than the wavelength order of light. And in order to realize the photonic crystal which operates in the wavelength area of light, the process tolerance below the wavelength of light is required. Therefore, a producible crystal structure is limited. The crystal structure currently expected that a band gap opens thoroughly in three dimensions is restricted to diamond structure and its related structure, as far as it is known till the present. Although the processing technology with the process tolerance below the wavelength of light has a semiconductor lithography technology represented by electron beam lithography and dry etching, the thing as shown in drawing 5 is proposed as periodical structure of the photonic crystal which can be produced with such art and a band gap opens.

[0004]The photonic crystal 50 shown in drawing 5 (a) forms the mask 52 for dry etching on the crystal 51 of bulk first, The hole 53 of two-dimensional array is formed in this mask 52, and it is produced by etching into this by the good beam 54 for dry etching of vertical nature 3 times from a slanting angle. The three beams 54, 54, and 54 for etching shown in drawing 5 (a) maintain the angle whose each is 120 degrees, and the angle from the medial axis C is 35 degrees, respectively. This structure has become in the direction of an axial (110) bond of diamond structure with the structure which the hole has penetrated, it is proved by calculation that a band gap actually opens, and verification is performed experimentally in the microwave range.

[0005]Drawing 5 (b) is the photonic crystal 60 which rotates 90 degrees and is formed by piling up while shifting a half cycle every about a phase in the rods 59 and 59 and , which were located in a line with the constant interval, It is produced to the thing with a wavelength of about 12 micrometers by applying micromachine art (S-Y.Lin et al., Nature 394,251 (1998)). Also in this case, the direction of the rod 59 is equivalent to the shaft orientations (110) of diamond structure, and it is shown by calculation that a full photonic band gap opens. A full photonic band gap means "the state where the photonic band gap opened to the light which advances in the direction of all."

[0006]However, what was shown in drawing 5 is very difficult to make the crystal structure which has the above number of layers to some extent. As for the photonic crystal actually produced by the present by any method, a gap is located in infrared rays or a microwave range. Near-infrared rays and the three-dimensional photonic crystal which the band gap opened thoroughly in the field of visible light are not realized.

[0007]There is a linear polarization child as a typical application of photonic crystals other than the above mentioned full photonic band gap. Into a photonic crystal, since the propagation mode allowed becomes anisotropic, it can have artificial birefringence, and a photonic crystal can be used as a linear polarization child using this. Although the usual linear polarization child uses the birefringence which a substance has or it is produced using anisotropic absorption (dichroism), since it is not accompanied by absorption but has big anisotropy when a photonic crystal is used, the linear polarization child of high performance is realizable. Since it will realize if the periodical structure which broke down symmetry between two independent 2-ways as shown in drawing 6

(a) and (b) is made, the linear polarization child can produce comparatively easily (it is a one-dimensional photonic crystal in which a mutual multilayer film also has such anisotropy most simply). Drawing 6 (a) shows the linear polarization child 80 to whom drawing 6 (b) acted the two-dimensional array of the columnar body 81 as the linear polarization child 70 who put the plate 71 in order in series. Although the optical anisotropy which a photonic crystal can have can have the anisotropy not only according to linear polarization but the theoretically collapsed symmetry, what used such photonic crystalline anisotropy so far in addition to the linear polarization child does not exist. For example, if it is the structure in which symmetry-of-revolution nature collapsed, optical rotation (or optical activity) will be produced. The optical rotation (or optical activity) of a substance is a phenomenon revealed in the isotropic medium which comprises molecular structure with an optical isomer like spirit of turpentine, and a crystal structure with specific symmetry like crystal.

It is character peculiar to a substance.

Optical rotation is very important in linear polarization control and circular light control, and optics, such as 1/2 wavelength plate and 1/4 wavelength plate, are made using this character. However, the optical rotation itself was difficult to control the size artificially dramatically small (it is about 10 degrees/mm with crystal).

[0008]

[Problem(s) to be Solved by the Invention] In this invention, it aims at solving the problem that the function realized had restriction since the crystal structure was limited to the structure represented by drawing 5 etc. in the photonic crystal which was studied conventionally and has been produced. That is, this invention has a different crystal structure from the former, and an object of this invention is to provide a new photonic crystal which has a full photonic band gap and optical rotation, and a manufacturing method for the same.

[0009]

[Means for Solving the Problem] This invention proposes a photonic crystal which carried out two-dimensional array of the columnar body with which an identical material portion which forms spirally at least two kinds of material portions from which a refractive index differs on a substrate was connected spirally continuously (Claim 1). If the number of materials to laminate is two, a columnar body will become double helical conformation. A photonic crystal which has such three-dimensional spiral structure has the symmetry similar to diamond structure, Theoretical calculation proves that it can have a full photonic band gap (A. Chutinan and S.Noda, Physical Review B 57, R2006 (1998)). Since the symmetry of right-handed rotation and left-handed rotation has collapsed when structure of this photonic crystal is seen from the upper surface, it can have optical rotation as well as a case where they are a right-handed quartz and a left-handed quartz. A full photonic band gap means the state where a photonic band gap opened to light which advances in all the directions. Although two-dimensional array in a description of Claims means arranging a columnar body in on a substrate based on fixed regularity here, two-dimensional array constituted by disturbing this fixed regularity based on another regularity is also included in two-dimensional array.

[0010] This invention is a manufacturing method of a photonic crystal which carried out two-dimensional array of the columnar body with which an identical material portion which forms spirally at least two kinds of material portions from which a refractive index differs on a substrate was connected spirally continuously. A manufacturing method of a photonic crystal performed on shape for said one step of spiral by repeating a process (B) which makes at least two kinds of material portions [every one step of] from which a refractive index differs laminate one by one alternately is proposed after a process (A) of forming and carrying out two-dimensional array of the shape for one step of spiral on a substrate (Claim 2). According to this, shape for one step of spiral which carried out the two-dimensional array to the shape of a lattice into a field is produced, every one step of spiral is accumulated for a material portion which makes ladder running shape for one step of this spiral and from which a refractive index differs, and the photonic crystal according to claim 1 is produced as a result.

[0011] Said process (B) this invention holding shape which carried out two-dimensional array on a substrate in said process (A) by bias weld slag. It is a manufacturing method of a photonic crystal being a thing which makes at least two kinds of material portions from which said refractive index differs every one step of spiral laminate one by one alternately. According to this, a precise columnar body can be constituted, maintaining shape faithful to the first shape.

[0012]On other substrates with which said process (A) differs from a substrate which produces a photonic crystal, this invention carries out two-dimensional array of the shape equivalent to shape for said one step of spiral, and uses other substrates as a force piston, It is what transfers and carries out two-dimensional array of the shape for said one step of spiral on this board by forcing said force piston on a thin film formed on said substrate, On shape for said one step of spiral, said process (B) applies at least two kinds of materials [every one step of] in which refractive indicees differ one by one, and forms a thin film, Whenever it forms a thin film for one step of this spiral, it is a manufacturing method of a photonic crystal being a process which transfers shape for said one step of spiral by said force piston, and is made to laminate every one step one by one (Claim 4). According to this, whenever it forms a coat, every one step of spiral is transferred by a force piston, and it goes. A force piston is reused.

[0013]And this invention is performing electron-beam-lithography exposure and changing an exposure dose by a place on resist during this exposure, after applying resist on said substrate, or a substrate besides the above, It is a manufacturing method of a photonic crystal forming a resist pattern which carried out two-dimensional array of the shape for said one step of spiral, and carrying out two-dimensional array of the shape for said one step of spiral on said substrate, or a substrate besides the above based on this resist pattern (Claim 5). A resist pattern of different thickness can be formed by changing an exposure dose by a place on resist. It can etch based on this resist pattern, and shape for one step of spiral can be formed on substrate ** or other substrate **. Spiral structure is formed one by one on this as a substrate with which a part for the first one step of spiral was formed, and this substrate ** becomes a photonic crystal. Other substrate ** are used for screw type-like transfer (stamp) as a force piston.

[0014]

[Embodiment of the Invention]The photonic crystal of this invention and the embodiment of the manufacturing method are described in detail with reference to Drawings. Drawing 1 is a perspective view showing the periodical structure of the photonic crystal in this embodiment. Drawing 2 is a front view showing the spiral structure of the photonic crystal in this embodiment. Drawing 3 is a perspective view showing the 1st manufacturing method of the photonic crystal in this embodiment. Drawing 4 is a perspective view showing the 2nd manufacturing method of the photonic crystal in this embodiment.

[0015]<<Composition of a photonic crystal>> the photonic crystal 10 in this embodiment, It comprises carrying out two-dimensional array of the columnar body 12 which forms spirally the material portion (the low refractive index material part 12a, the high refractive index material part 12b) which has two kinds from which a refractive index differs of different refractive indicees on the substrate 11 as shown in drawing 1 (a). Each columnar body 12 serves as multiple spiral structure including double helical conformation. The substrate 11 consists of silicon (Si) in this embodiment. The low refractive index material part 12a consists of silicon dioxides (SiO₂), refractive index 1.4), and the high refractive index material part 12b consists of silicon (Si, refractive index 3.5). The low refractive index material part 12a and the high refractive index material part 12b constitute the columnar body 12 of the double helical conformation which continued, respectively. Thickness d (thickness [of the material portion used as especially a core] d) of one material portion which forms double helical conformation is about about 1 of the wavelength of the light made into the purpose / 2. Although drawing 2 shows the spiral structure (portion used as a core) by the high refractive index material part 12b (that is, silicon) with the substrate 11, it becomes what also shows drawing 2 the spiral structure (portion used as a clad) by the low refractive index material part 12a formed on the substrate 11, and the same thing. Here, the portion shown with 12 s of numerals in drawing 1 etc. is the first one step of spiral formed on the substrate 11. The construction material as the substrate 11 and the high refractive index material part 12b with these first 1 step of spiral 12 s same in this embodiment (silicon) [Si] It becomes. in drawing 1 (drawing 2 – drawing 4) etc., although the upper surface portion of the columnar body 12, the upper surface portion for first 1 step of spiral 12 s, etc. are stair-like, this is the description for emphasizing a spiral thing in Drawings, and is such in practice -- it is not stair-like. However, it is also possible to make it stair-like.

[0016]The ratio of the refractive index of the low refractive index material part 12a which constitutes the ** columnar body 12, and the high refractive index material part 12b is opening the photonic crystal 10 of this embodiment greatly or more with two, ** The columnar body 12 has arranged [having spiral structure with the periodic columnar body 12,] periodically on the **

board 11. And since thickness d of the material portion (especially high refractive index material part 12b) which constitutes ** spiral is about 1/2 of the wavelength of the light made into the purpose, a full photonic band gap can be formed. Since the symmetry of right-handed rotation and left-handed rotation has collapsed, this structure can have optical rotation like [in the case of being a right-handed quartz and a left-handed quartz]. Such a photonic crystal is used for a light emitting device (laser and LED) etc. using a full photonic band gap. It is used as an artificial optically active substance using optical rotation.

[0017] Although the low refractive index material part 12a from which, as for the material which constitutes the above mentioned photonic crystal 10, the substrate 11 constitutes silicon and the columnar body 12 is a silicon dioxide and the high refractive index material part 12b which constitutes the columnar body 12 similarly is silicon, material is not limited to these. It is not asked whether the substrate 11, the low refractive index material part 12a, and the high refractive index material part 12b are crystalline substances or it is amorphous. Although the columnar body 12 was constituted from material which has two kinds of different refractive indicees, it is not limited to two kinds.

[0018] <<Manufacturing method of a photonic crystal>> The manufacturing method (the 1st manufacturing method, the 2nd manufacturing method) of the photonic crystal 10 in an embodiment of the invention is explained hereafter.

[0019] [Refer to the 1st manufacturing method and drawing 3.] The 1st manufacturing method is a manufacturing method of the photonic crystal 10 as for which every one step of spiral accumulates the low refractive index material part 12a and the high refractive index material part 12b by turns and which produces first 1 step of spiral 12 s on the substrate 11 (process A), and goes on this the first 1 step of spiral 12 s itself (process B). That is, it is divided into the process of laminating the material which has the process of producing first 1 step of spiral 12 s by the process A, and a refractive index which is different while transferring this pattern faithfully by the process B on the pattern for part 12 s for the first one step of this spiral, and producing the columnar body 12. Bias weld slag performs production of the columnar body 12.

[0020] (1) Apply the resist 31 first on the substrate 11 which consists of silicon. Generally, in electron beam exposure, if the thickness of the resist which remains after development is exposed changing a light exposure by a place in order to be dependent on a light exposure (exposure dose), it can change the thickness of the resist pattern after development by a place. It exposes changing a light exposure by a place using this principle on the resist 31 applied on the substrate 11 (refer to drawing 3 (a)). As this shows drawing 3 (b), the resist pattern 32 for producing part 12 s for the first one step of spiral can be formed on the substrate 11.

[0021] (2) Transfer the resist pattern 32 of the shape of this screw type to the substrate 11 by the good dry etching (reactive ion etching etc.) of the vertical nature which can shave the resist pattern 32 and the substrate 11 at uniform velocity next. And the remaining resist patterns 32 are exfoliated. Then, the substrate 11 with which the shape of a screw type as shown in drawing 3 (c) (namely, part 12 s for the first one step of spiral) was formed is produced. That is, since the thickness of the resist pattern 32 changes with places, the quantity etched also changes according to the thickness of the resist pattern 32 (namely, since the resist pattern 32 is also etched in addition to the substrate 11), The shape according to the shape (thickness) of the resist pattern 32 is formed on the substrate 11 as a result. Even this is the making process A of the first half. The height for part 12 s for the first one step of spiral (thickness) is $2d$ here. The thickness for first 1 step of spiral 12 s is governed by the selection ratio in etching with the resist pattern 32 and the substrate 11, etc. Incidentally, for first 1 step of spiral 12 s, although it is made to arrange at a two-dimensional lattice point as shown in drawing 1 (b), by drawing 3, only 1 step of spiral 12 s of the beginning of one lattice point (columnar body 12) is illustrated for convenience.

[0022] (3) Then, every one step of spiral laminates the low refractive index material part 12a (here a silicon dioxide, the refractive index 1.4) and the high refractive index material part 12b (here silicon, the refractive index 3.5) by turns by bias weld slag on the substrate 11 with which part 12 s for the first one step of this spiral was formed. In bias weld slag, etching and deposition happen simultaneously and the ratio of contribution of both can be controlled by weld slag conditions, such as bias. If the character in which the angular dependence of etching and deposition differs is used, a multilayer film can be laminated keeping faithful the initial form of the substrate begun by choosing weld slag conditions suitably. This art is known as self cloning

technique (S. Kawakami, Electronics Letter, vol.33, p1260 (1997)). The low refractive index material part 12a is laminated using this lamination condition defined beforehand by thickness d of the 2-d half which is the thickness for first 1 step of spiral 12 s on the substrate 11 with which first 1 step of spiral 12 s was formed (refer to drawing 3 (d)). When laminating, lamination takes place also to flat-surface parts other than 12S by the first one step of spiral, but in each figure, lamination of a flat-surface part is disregarded and is illustrating only the lamination on the first one step of spiral 12s so that intelligibly [the shape produced].

[0023](4) Next, similarly laminate one step of spiral which becomes a top for one step of spiral which consists of the low refractive index material part 12a from the high refractive index material part 12b by thickness d. The shape which this shows to drawing 3 (e) is formed. The structure to which it was connected with double-helix shape by the amount of [which consists of one step of spiral which consists of the low refractive index material part 12a like drawing 3 (f), and the high refractive index material part 12b] one step of spiral, respectively is produced by repeating lamination for one step of spiral in drawing 3 (d), and lamination for one step of spiral in drawing 3 (e) henceforth. Although a spacial configuration is a little unclear in drawing 3 (f), it turns out that it will become like drawing 2 if only the portion (that is, silicon part) of the high refractive index material part 12b is displayed, and the high refractive index material part 12b has become screw type-like.

[0024]It turns out that the lattice which arranges the columnar body 12 can be changed into freedom, such as a tetragonal lattice and a triangular lattice, and a full photonic band gap opens it about the arrangement structure of the columnar body 12 started from the tetragonal lattice and the triangular lattice with the first lithography. If it sees from the upper surface, the symmetry of right-handed rotation and left-handed rotation will have collapsed, and it is clear that structure's of the photonic crystal produced to arbitrary lattices it can have artificial optical rotation. Although silicon and a silicon dioxide were used as a component in this 1st manufacturing method, also in other substances, the shape controlling by bias weld slag is possible, and not being restricted to the combination of this material is obvious.

[0025][Refer to the 2nd manufacturing method and drawing 4.] The 2nd manufacturing method carries out two-dimensional array of 22 s of the 1 step of spiral shape corresponding on other substrates 21 which are different in the substrate 11 which produces the photonic crystal 10 at first 1 step of spiral 12 s, and uses the other substrates 21 as the force piston 20, The process A of transferring first 1 step of spiral 12 s by forcing the force piston 20 on thin film ts' formed on the substrate 11. And the photonic crystal 10 is produced following this process A by thin film ta' from which a refractive index differs, and the process B which transfer 22 s of 1 step of spiral shape one by one by the force piston 20 and to which two-dimensional array of the columnar body 12 is carried out whenever every one step of spiral laminates tb' one by one and it laminates one step of thin film. Generally the art of pushing the mold (mold) of minute shape in this way, and processing other materials into identical shape is called nano print art.

[0026](1) Carry out two-dimensional array of 22 s of the 1 step of spiral shape equivalent to part 12 s for the first one step of spiral to other substrates 21 (here, it consists of silicon) which are different first in the substrate 11 which produces the photonic crystal 10. This method of carrying out two-dimensional array is based on the means same with having explained with the 1st manufacturing method. That is, resist is applied on other substrates 21, a light exposure is changed by the place of resist, is exposed, and a resist pattern is formed. Then, two-dimensional array of 22 s of the 1 step of spiral shape is carried out by performing dry etching based on this resist pattern. The height (thickness) of 22 s of 1 step of spiral shape is 2d here. Henceforth, other substrates 21 with which two-dimensional array of 22 s of these 1 step of spiral shape was carried out are used as the force piston 20 (mold).

[0027](2) Next, carry out spin coating (spin coat) of the PZT solution (lead zirconate titanate) on the substrate 11, and form thin film ts' (soft thin film) which heat-treats this coat and consists of PZT(s) on the substrate 11. It is made for the thickness after heat cure to be set to 2 d as for the thickness of this thin film ts'. Then, the force piston 20 is forced on this thin film ts', and the shape for first 1 step of spiral 12 s is transferred (refer to drawing 4 (a)). (stamp) Thin film ts' is heated and (annealing) stiffened after shape transfer. Thereby, thin film ts' becomes the hard thin film ts (refractive index 2.6) which consists of a transparent material of the refractive index 2.6. The thin film ts after this hardening is set to 1 step of spiral 12 s of the beginning in the description of Claims.

[0028](3) Then, on the substrate 11 with which the first one step of spiral (drawing 1 etc. are shown in 12 s) was formed, carry out spin coating of the oxidized silicon composite material coating liquid, and form thin film ta' (soft thin film). Thin film ta' is formed so that the thickness of the thin film ta (hard) after carrying out heat cure may be set to d. Incidentally, oxidized silicon composite material coating liquid is filled by the portion (outside of a graphic display) of the hole made by the force piston 20. After forming thin film ta', the force piston 20 is forced on the same position as a part for the first one step of spiral. Under the present circumstances, it is made for the thickness of the thin film ta after adjusted and carrying out heat cure of the thrust to be set to d. Thereby, 22 s of 1 step of spiral shape is transferred (stamp). And thin film ta' is heated and stiffened and it is considered as the thin film ta (refractive index 1.4) which consists of silicon dioxides (refer to drawing 4 (b)). The thin film ta which transferred 22 s of these 1 step of spiral shape becomes one step of spiral which consists of the low refractive index material part 12a in the description of Claims.

[0029](4) Form thin film tb' (soft thin film) which carries out spin coating of the PZT solution, heat-treats it shortly, and consists of PZT(s). Thin film tb' is formed so that the thickness of the thin film tb after carrying out heat cure may be set to d. A PZT solution is filled by the portion (outside of a graphic display) of the hole made by the force piston 20. And (it being also the same position as the hole made by operation by aforementioned (3)) and the force piston 20 are forced on the same position as the first one step of spiral. Under the present circumstances, it is made for the thickness of the coat tb after adjusted and carrying out heat cure of the thrust to be set to d. Thereby, 22 s of 1 step of spiral shape is transferred (stamp). And thin film tb' is heated and stiffened and it is considered as the thin film tb (refractive index 2.6) which consists of PZT(s) (refer to drawing 4 (c)). The thin film tb which transferred 22 s of these 1 step of spiral shape becomes one step of spiral which consists of the high refractive index material part 12b in the description of Claims.

[0030](5) Succeedingly, repeat operation with the above (3), and operation with the above (4), accumulate the thin film (ta, tb) of the number of specified stages, and form the columnar body 12.

[0031]Thus, thin film ta' and after forming tb' (soft thin film), carry out die pressing by the force piston 20, carry out, and shape is transferred (stamp). The photonic crystal 10 which carried out two-dimensional array of the columnar body 12 with which the identical material portions of the low refractive index material part 12a and the high refractive index material part 12b shown in drawing 1 (a) were continuously connected spirally also in carrying out heat cure of this and laminating it one by one is producible. Although alignment is required in shape transfer of each class, the alignment art of the stepper in X-ray lithography can be used for alignment. A piezoelectric element can be used for adjustment of the pattern depth (thickness d, 2d).

[0032]Although PZT and oxidized silicon were used in this 2nd manufacturing method as a substance in which shape is transferred (stamp), if polymer, an oxide, etc. are generally materials processible with a stamp, it is obvious for the same method to be applied. Although silicon was used as a substrate (other substrates 21) of the force piston 20, it is also possible this and to transpose to other materials, such as silicon carbide (SiC), and it is not limited to silicon. The lattice which arranges the columnar body 12 is changeable into freedom, such as a tetragonal lattice and a triangular lattice, by the force piston 20.

[0033]As mentioned above, although explained per embodiment of the invention, in the range which has an effect which is not limited to the means and technique which were not necessarily described above, attains the purpose said to this invention, and is said to this invention, this invention can carry out change implementation suitably. For example, although the photonic crystal was produced from two kinds of materials in this embodiment, even if it laminates three or more kinds of materials in assignment turn suitably, it is obvious that the shape of same screw type is produced. When the number of materials is three, it is made for the thickness (thickness for one step of spiral which consists of three material portions) which added three material portions to become the same as the thickness for the first one step of spiral. On the contrary, since it is a portion (high refractive index material part) used as the core in which light is confined, becoming a standard of thickness can determine the thickness of the portion which serves as a core first, it can determine the thickness of a clad required for the next, and can be made into the procedure of determining the thickness for the first one step of spiral (1 step of spiral shape of a force piston). Although how to use bias weld slag art and nano print art was

described as a manufacturing method of a photonic crystal, the same effect is expectable even if it laminates by other methods, such as semiconductor epitaxial growth, saving the shape of first screw type.

[0034]

[Effect of the Invention] As explained above, according to the photonic crystal of this invention, a full photonic band gap can be formed and it can apply to a light emitting device, an optical waveguide, etc. Since the symmetry of right-handed rotation and left-handed rotation has collapsed, the structure of the photonic crystal of this invention has optical rotation like [in the case of being a right-handed quartz and a left-handed quartz], and can apply it as a linear polarization child. According to the manufacturing method of the photonic crystal of this invention, an identical material portion can produce certainly the photonic crystal which has the columnar body connected continuously spirally. Especially, the photonic crystal of this invention is certainly producible by applying bias weld slag art or nano print art. Without being limited to production of the photonic crystal according to claim 1, the manufacturing method of the photonic crystal of this invention can be applied, also when producing the photonic crystal which has other structures. According to this invention, the first part for one step of spiral and force piston are producible with certainly sufficient accuracy. This force piston is repeatedly applicable to production of a photonic crystal repeatedly.

[Translation done.]

* NOTICES *

JPO and INPI are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1. This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
2. **** shows the word which can not be translated.
3. In the drawings, any words are not translated.

DESCRIPTION OF DRAWINGS

[Brief Description of the Drawings]

[Drawing 1] It is a perspective view showing the periodical structure of the photonic crystal in this embodiment, etc. (a) shows one step of spiral by which (b) was formed on the substrate in the photonic crystal. This (b) also shows a force piston.

[Drawing 2] It is a front view showing the spiral structure of the photonic crystal in this embodiment.

[Drawing 3] It is a perspective view showing the 1st manufacturing method of the photonic crystal in this embodiment. (a) a substrate and the resist pattern in which (b) was formed on the substrate in resist, (f) shows one columnar body for one step of spiral which consists of a high refractive index material part by which (e) was formed on (d) in one step of spiral which (c) becomes from the low refractive index material part by which (d) was formed in the top for the first one step of spiral in the first one step of spiral.

[Drawing 4] It is a perspective view showing the 2nd manufacturing method of the photonic crystal in this embodiment. (a) shows the process in which (d) laminates one step of spiral one by one, and it goes one step of spiral which consists of a high refractive index material part by which (c) was formed on (b) in one step of spiral which consists of a low refractive index material part by which (b) was formed in the top for the first one step of spiral in production for the first one step.

[Drawing 5] It is a mimetic diagram showing the structure of the three-dimensional photonic crystal in the conventional method, etc. (a) shows that by which (b) depends on micromachine art what is depended on dry etching.

[Drawing 6] It is a mimetic diagram showing the structure of the photonic crystal form light

polarizer produced by the conventional manufacturing method. (a) shows that to which (b) carried out two-dimensional array of the columnar body for what put the plate in order.

[Description of Notations]

10 Photonic crystal

11 Substrate

12 Columnar body

12a Material in which refractive indices differ (low refractive index material part)

12b Material in which refractive indices differ (high refractive index material part)

12 s A part for the first one step of spiral

20 Force piston

21 Other substrates

22 s 1 step of spiral shape

31 Resist

32 Resist pattern

ta' thin film (thin film for forming the low refractive index material part 12a)

tb' thin film (thin film for forming the high refractive index material part 12b)

ts' thin film (thin film for forming part 12 s for the first one step of spiral)

[Translation done.]

* NOTICES *

JPO and INPI are not responsible for any
damages caused by the use of this translation.

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号
特開2000-329953
(P2000-329953A)

(43)公開日 平成12年11月30日 (2000.11.30)

(51)Int.Cl.⁷

G 0 2 B 6/12
6/13

識別記号

F I

G 0 2 B 6/12

テ-マコ-ト⁸ (参考)
N 2 H 0 4 7
M

審査請求 未請求 請求項の数 5 O L (全 10 頁)

(21)出願番号 特願平11-139423

(22)出願日 平成11年5月20日 (1999.5.20)

(71)出願人 000004226

日本電信電話株式会社

東京都千代田区大手町二丁目3番1号

(72)発明者 納富 雅也

東京都新宿区西新宿三丁目19番2号 日本
電信電話株式会社内

(72)発明者 石井 哲好

東京都新宿区西新宿三丁目19番2号 日本
電信電話株式会社内

(74)代理人 100064414

弁理士 磯野 道造

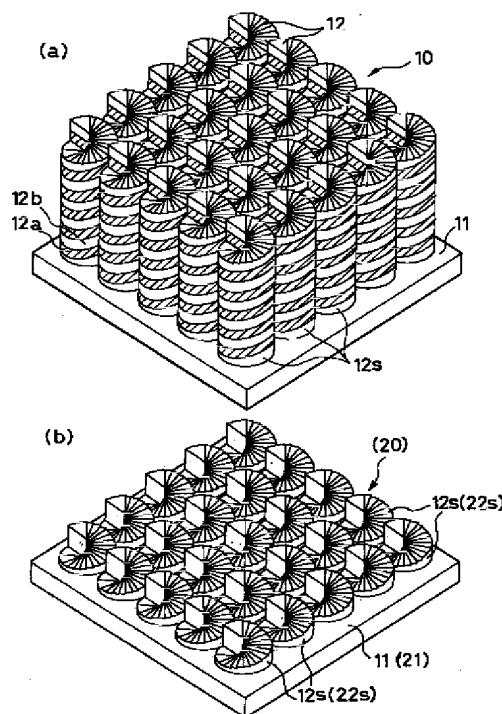
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 フォトニック結晶及びその作製方法

(57)【要約】

【課題】 従来とは異なる新規な結晶構造を持ち、フルフォトニックバンドギャップ及び旋光性を有するフォトニック結晶及びその作製方法を提供する。

【解決手段】 基板11上に屈折率の異なる少なくとも2種類の材料部分12a, 12b, , を螺旋状に形成してなる同一材料部分が連続的に螺旋状に繋がった柱状体12を2次元配列したフォトニック結晶。また、基板11上に屈折率の異なる少なくとも2種類の材料部分12a, 12b, , を螺旋状に形成してなる同一材料部分が連続的に螺旋状に繋がった柱状体12を2次元配列したフォトニック結晶の作製方法であって、基板11上に最初の螺旋一段分12sを形成して2次元配列させる工程(A)の後、前記最初の螺旋一段分12sの上に、屈折率の異なる少なくとも2種類の材料部分12a, 12b, , を互い違いに順次螺旋一段分ずつ積層させる工程(B)を繰り返して行なうこと。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 基板上に屈折率の異なる少なくとも2種類の材料部分を螺旋状に形成してなる同一材料部分が連続的に螺旋状に繋がった柱状体を2次元配列したこと、を特徴とするフォトニック結晶。

【請求項2】 基板上に屈折率の異なる少なくとも2種類の材料部分を螺旋状に形成してなる同一材料部分が連続的に螺旋状に繋がった柱状体を2次元配列したフォトニック結晶の作製方法であって、基板上に最初の螺旋一段分を形成して2次元配列させる工程(A)の後、

前記最初の螺旋一段分の上に、屈折率の異なる少なくとも2種類の材料部分を互い違いに順次螺旋一段分ずつ積層させる工程(B)を繰り返して行なうこと、を特徴とするフォトニック結晶の作製方法。

【請求項3】 前記工程(B)が、バイアスバッタにより、前記工程(A)において基板上に2次元配列した形状を保持しつつ、前記屈折率の異なる少なくとも2種類の材料部分を互い違いに順次螺旋一段分ずつ積層させること、を特徴とする請求項2に記載のフォトニック結晶の作製方法。

【請求項4】 前記工程(A)が、フォトニック結晶を作製する基板とは異なる他の基板上に前記最初の螺旋一段分に相当する螺旋一段形状を2次元配列させ、この他の基板を押し型として、前記基板上に形成された薄膜に前記押し型を押し付けることにより前記基板上に前記最初の螺旋一段分を転写して2次元配列させるものであり、

前記工程(B)が、前記最初の螺旋一段分の上に、屈折率の異なる少なくとも2種類の材料を順次螺旋一段分ずつ塗布して薄膜を形成し、この螺旋一段分の薄膜を形成するごとに前記押し型により前記螺旋一段形状を転写して順次螺旋一段分ずつ積層させる工程であること、を特徴とする請求項2に記載のフォトニック結晶の作製方法。

【請求項5】 前記基板又は前記他の基板上にレジストを塗布した後、電子ビームリソグラフィ露光を行ない、この露光中に露光ドーズ量を前記レジスト上の場所により変化させることで、

前記最初の螺旋一段分又は前記螺旋一段形状を作製するためのレジストパターンを形成し、

このレジストパターンに基づいて前記基板上に前記最初の螺旋一段分を2次元配列させ、又は前記他の基板上に前記螺旋一段形状を2次元配列させること、を特徴とする請求項2乃至請求項4のいずれかの一項に記載のフォトニック結晶の作製方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、光情報処理や光伝送などに用いられるレーザ、光導波路、光集積回路など

の様々な光デバイスを構成する基本構造であるフォトニック結晶及びその作製方法に関する。

【0002】

【従来の技術】3次元的な誘電体周期構造中では、光は周期的振動を受け、その周波数の分散関係は結晶中の電子のバンド構造と同じ様なバンド構造をとり、このような誘電体周期構造はフォトニック結晶(Photonic Crystal)と呼ばれている。フォトニック結晶中の光の伝搬はバンド構造によって決定されるため、結晶構造や周期的振動の大きさを制御することにより、その光学的性質を自由に設計することが可能である。例えば、フォトニック結晶は、フォトニック結晶を構成する材料間の屈折率比を大きくし、周期構造を適切に選定すれば、強力な光閉じ込め能などを発揮する。このフォトニック結晶は、超高密度光集積回路や超高効率発光素子への適用が期待されている。

【0003】フォトニック結晶の有用性は、1987年にYablonovitchにより、3次元的にバンドギャップが開いたフォトニック結晶(フォトニックバンドギャップ材料)を用いて光を完全に閉じ込めることができるという指摘(E.Yablonovitch, Phys. Rev. Lett. 58, 2059(1987))により注目されるようになったが、当時のフォトニック結晶はミリメートル周期の大きな構造であり、波長の長い電磁波(マイクロ波など)を使って動作され、評価された。しかし、例えば光通信などで利用される光の波長領域は1~1.5μmであり、この波長領域でフォトニック結晶を動作させるには、フォトニック結晶の周期を光の波長オーダよりも小さくする必要がある。そして、光の波長領域で動作するフォトニック結晶を実現するためには、光の波長以下の加工精度が要求される。したがって、作製可能な結晶構造は限定される。また、3次元的に完全にバンドギャップが開くと予想されている結晶構造は、今まで知られている限りでは、ダイヤモンド構造及びその関連する構造に限られている。光の波長以下の加工精度を持つ加工技術は、電子ビームリソグラフィやドライエッチングに代表される半導体リソグラフィ技術があるが、このような技術で作製可能かつバンドギャップが開くフォトニック結晶の周期構造として、図5に示すようなものが提案されている。

【0004】図5(a)に示すフォトニック結晶50は、先ずバルクの結晶51上にドライエッチング用のマスク52を設け、このマスク52に2次元配列の穴53を形成し、これに斜め角度から3回垂直性の良いドライエッチング用のビーム54によりエッチングを行うことで作製される。図5(a)に示される3本のエッチング用のビーム54, 54, 54は、それぞれが120度の角度を保ち、また、中心軸Cからの角度はそれぞれ35度になっている。この構造はダイヤモンド構造の(110)軸ボンド方向に穴が貫通している構造となっており、実際にバンドギャップが開くことが計算により実証

されており、マイクロ波領域では実験的に検証が行われている。

【0005】また、図5 (b) は、一定間隔で並んだロッド59, 59, , を、位相を半周期ずつずらしながら90度回転して重ねていくことにより形成されるフォトニック結晶60であり、マイクロマシン技術を応用することにより波長1.2μm程度のものまで作製されている (S-Y. Lin et al., Nature 394, 251 (1998))。この場合もロッド59の方向がダイヤモンド構造の(110)軸方向に相当しており、フルフォトニックバンドギャップが開くことが計算により示されている。なお、フルフォトニックバンドギャップとは「全ての方向に進行する光に対してフォトニックバンドギャップの開いた状態」をいう。

【0006】しかし、図5に示したものは、ある程度以上の層数を持つ結晶構造を作ることは極めて困難である。またいずれの方法でも、現在までに実際に作製されているフォトニック結晶は、ギャップが赤外又はマイクロ波領域に位置するものであり、近赤外、可視光の領域で完全にバンドギャップの開いた3次元フォトニック結晶は実現していない。

【0007】また、前記したフルフォトニックバンドギャップ以外のフォトニック結晶の代表的な応用例として、直線偏光子がある。フォトニック結晶中においては、許される伝搬モードが異方的になるため人工的な複屈折性を持ち、これをを利用してフォトニック結晶を直線偏光子として用いることができる。通常の直線偏光子は物質が持つ複屈折性を利用するか、または異方的な吸収(2色性)を用いて作製されているが、フォトニック結晶を用いると吸収を伴わず大きな異方性を持つので、高い性能の直線偏光子を実現することができる。直線偏光子は図6 (a) (b) のように二つの独立な2方向の間で対称性を崩した周期構造を作れば実現されるので、比較的容易に作製できる(最も単純には交互多層膜もそのような異方性を持つ1次元フォトニック結晶である)。なお、図6 (a) は板状体71を直列に並べた直線偏光子70を、図6 (b) は柱状体81を2次元配列した直線偏光子80を示す。フォトニック結晶が持つ光の異方性は、直線偏光に限らず原理的には崩れた対称性に応じた異方性を持ちうるが、今までのところ直線偏光子以外にこのようなフォトニック結晶の異方性を利用したものは存在しない。例えば、回転対称性が崩れた構造であれば、旋光性(又は光学活性)を生じる。物質の旋光性(又は光学活性)は、テレピン油のような光学異性体を持つ分子構造で構成される等方性媒質や、水晶のような特定の対称性を持った結晶構造において発現する現象であり、物質固有の性質である。旋光性は直線偏光制御、円偏光制御において極めて重要で、この性質を利用して1/2波長板、1/4波長板などの光学部品が作られている。しかし、旋光性そのものは非常に小さく(水

晶で10度/mm程度)、またその大きさを人工的に制御することも困難であった。

【0008】

【発明が解決しようとする課題】本発明では、従来研究され、また作製されてきたフォトニック結晶において、その結晶構造が図5などに代表される構造に限定されていたため、実現される機能に制限があったという問題点を解決することを目的とする。つまり本発明は、従来とは異なる結晶構造を持ち、フルフォトニックバンドギャップ及び旋光性を有する新規なフォトニック結晶及びその作製方法を提供することを目的とする。

【0009】

【課題を解決するための手段】本発明は、基板上に屈折率の異なる少なくとも2種類の材料部分を螺旋状に形成してなる同一材料部分が連続的に螺旋状に繋がった柱状体を2次元配列したフォトニック結晶を提案する(請求項1)。積層する材料が2種類であれば柱状体は二重螺旋構造になる。このような3次元的な螺旋構造を有するフォトニック結晶はダイヤモンド構造に似た対称性を持ち、フルフォトニックバンドギャップを持ちうることが理論計算により証明されている(A. Chutinan and S. Noda, Physical Review B 57, R2006 (1998))。また、このフォトニック結晶の構造を上面から見た場合、右回りと左回りの対称性が崩れているため、右水晶と左水晶の場合と同じように旋光性を持ちうる。なお、フルフォトニックバンドギャップとは、全ての方向に進行する光に対してフォトニックバンドギャップの開いた状態をいう。ここで、特許請求の範囲の記載における2次元配列とは、一定の規則性に基づいて柱状体を基板上に並べることを意味するが、2次元配列には、この一定の規則性を別の規則性に基づいて乱すことにより構成される2次元配列も含む。

【0010】また、本発明は、基板上に屈折率の異なる少なくとも2種類の材料部分を螺旋状に形成してなる同一材料部分が連続的に螺旋状に繋がった柱状体を2次元配列したフォトニック結晶の作製方法であって、基板上に螺旋一段分の形状を形成して2次元配列させる工程

(A)の後、前記螺旋一段分の形状の上に、屈折率の異なる少なくとも2種類の材料部分を互い違いに順次一段分ずつ積層させる工程(B)を繰り返し行なうフォトニック結晶の作製方法を提案する(請求項2)。これによれば、格子状に面内に2次元配列した螺旋一段分の形状を作製し、この螺旋一段分の形状を足がかりにして屈折率の異なる材料部分を螺旋一段分ずつを積み上げ、結果として請求項1に記載のフォトニック結晶を作製する。

【0011】また、本発明は、前記工程(B)が、バイアスパッタにより、前記工程(A)において基板上に2次元配列した形状を保持しつつ、前記屈折率の異なる少なくとも2種類の材料部分を互い違いに順次螺旋一段分ずつ積層させるものであることを特徴とするフォトニ

ック結晶の作製方法である。これによれば、最初の形状に忠実な形状を維持しつつ、かつ緻密な柱状体を構成することができる。

【0012】また、本発明は、前記工程（A）が、フォトニック結晶を作製する基板とは異なる他の基板上に前記螺旋一段分の形状に相当する形状を2次元配列させ、この他の基板を押し型として、前記基板上に形成された薄膜に前記押し型を押し付けることにより該基板上に前記螺旋一段分の形状を転写して2次元配列させるものであり、前記工程（B）が、前記螺旋一段分の形状の上に、屈折率の異なる少なくとも2種類の材料を順次一段分ずつ塗布して薄膜を形成し、この螺旋一段分の薄膜を形成するごとに前記押し型により前記螺旋一段分の形状を転写して順次一段分ずつ積層させる工程であることを特徴とするフォトニック結晶の作製方法である（請求項4）。これによれば、塗膜を形成するごとに、押し型により螺旋一段分ずつを転写して行く。押し型は、再利用される。

【0013】そして、本発明は、前記基板又は前記他の基板上にレジストを塗布した後、電子ビームリソグラフィ露光を行ない、この露光中に露光ドーズ量をレジスト上の場所により変化させることで、前記螺旋一段分の形状を2次元配列したレジストパターンを形成し、このレジストパターンに基づいて前記基板又は前記他の基板上に前記螺旋一段分の形状を2次元配列させること、を特徴とするフォトニック結晶の作製方法である（請求項5）。露光ドーズ量をレジスト上の場所によって変えることにより、異なる厚さのレジストパターンを形成することができる。このレジストパターンに基づいてエッチングを行ない、螺旋一段分の形状を基板^①又は他の基板^②上に形成することができる。この基板^①は最初の螺旋一段分が形成された基板としてこの上に順次螺旋構造が形成されて、フォトニック結晶となる。また、この他の基板^②は押し型として螺旋形状の転写（刻印）に使用される。

【0014】

【発明の実施の形態】本発明のフォトニック結晶及びその作製方法の実施の形態を、図面を参照して詳細に説明する。図1は、本実施の形態におけるフォトニック結晶の周期構造を示す斜視図である。図2は、本実施の形態におけるフォトニック結晶の螺旋構造を示す正面図である。図3は、本実施の形態におけるフォトニック結晶の第1の作製方法を示す斜視図である。図4は、本実施の形態におけるフォトニック結晶の第2の作製方法を示す斜視図である。

【0015】《フォトニック結晶の構成》本実施の形態におけるフォトニック結晶10は、図1（a）に示すように基板11の上に屈折率の異なる2種類の異なる屈折率を有する材料部分（低屈折率材料部12a、高屈折率材料部12b）を螺旋状に形成してなる柱状体12を、

2次元配列することで構成される。各柱状体12は二重螺旋構造を含む多重螺旋構造となる。本実施の形態において、基板11はシリコン（Si）よりなる。また、低屈折率材料部12aは二酸化珪素（SiO₂、屈折率1.4）によりなり、高屈折率材料部12bはシリコン（Si、屈折率3.5）によりなる。低屈折率材料部12aと高屈折率材料部12bは、それぞれ連続した二重螺旋構造の柱状体12を構成している。二重螺旋構造を形成する一つの材料部分の厚みd（特にコアとなる材料部分の厚みd）は、目的とする光の波長の約1/2程度である。なお、図2は高屈折率材料部12b（つまりシリコン）による螺旋構造（コアとなる部分）を基板11とともに示しているが、基板11上に形成される低屈折率材料部12aによる螺旋構造（クラッドとなる部分）も図2に示すものと同様のものになる。ここで、図1などにおいて符号12sで示される部分は、基板11上に形成された最初の螺旋一段分である。本実施の形態において、この最初の螺旋一段分12sは基板11及び高屈折率材料部12bと同じ材質（シリコン〔Si〕）による。なお、図1など（図2～図4）において、柱状体12の上面部分や最初の螺旋一段分12sの上面部分などが階段状になっているが、これは螺旋状であることを図面において強調するための記載であり、実際上はこのような階段状にはなっていない。ただし、階段状にすることも可能である。

【0016】本実施の形態のフォトニック結晶10は、^①柱状体12を構成する低屈折率材料部12aと高屈折率材料部12bの屈折率の比が2以上と大きく開いていること、^②柱状体12が周期的な螺旋構造を有していること、^③基板11上に柱状体12が周期的に配列していること、そして、^④螺旋を構成する材料部分（特に高屈折率材料部12b）の厚みdが目的とする光の波長の約1/2であることから、フルフォトニックバンドギャップを形成することができる。また、この構造は右回りと左回りの対称性が崩れているため右水晶と左水晶の場合のように、旋光性を持ち得る。このようなフォトニック結晶は、フルフォトニックバンドギャップを利用して発光素子（レーザやLED）などに使用される。また、旋光性を利用して人工旋光性物質として使用される。

【0017】前記したフォトニック結晶10を構成する材料は、基板11がシリコン、柱状体12を構成する低屈折率材料部12aが二酸化珪素、同様に柱状体12を構成する高屈折率材料部12bがシリコンであるが、材料はこれらに限定されることはない。また、基板11、低屈折率材料部12a、高屈折率材料部12bが結晶質であるか非晶質であるかも問わない。さらに、柱状体12は2種類の異なる屈折率を有する材料で構成したが、2種類に限定されるものではない。

【0018】《フォトニック結晶の作製方法》以下、本発明の実施の形態におけるフォトニック結晶10の作製

方法（第1の作製方法、第2の作製方法）を説明する。

【0019】〔第1の作製方法、図3参照〕第1の作製方法は、基板11の上に最初の螺旋一段分12sを作製し（工程A）、この最初の螺旋一段分12sそのもの上に交互に低屈折率材料部12aと高屈折率材料部12bを螺旋一段分ずつ積み重ねて行く（工程B）フォトニック結晶10の作製方法である。つまり、工程Aにより最初の螺旋一段分12sを作製するプロセスと、工程Bによりこの最初の螺旋一段分12sのパターン上にこのパターンを忠実に転写しながら異なる屈折率を有する材料を積層して柱状体12を作製するプロセスに分けられる。なお、柱状体12の作製はバイアススパッタにより行なう。

【0020】(1) 先ず、シリコンよりなる基板11上にレジスト31を塗布する。一般に電子ビーム露光においては、現像後に残るレジストの厚さは露光量（露光ドーピング量）に依存するため、露光量を場所によって変化させながら露光を行うと、現像後のレジストパターンの膜厚を場所によって変えることができる。この原理を用いて、基板11上に塗布したレジスト31上（図3(a)参照）に、露光量を場所により変えながら露光する。これにより図3(b)に示すように、最初の螺旋一段分12sを作製するためのレジストパターン32を、基板11上に形成することができる。

【0021】(2) この後に、レジストパターン32と基板11とを等速で削ることができる垂直性の良いドライエッティング（反応性イオンエッティングなど）により、この螺旋形状のレジストパターン32を基板11に転写する。そして、残りのレジストパターン32を剥離する。すると図3(c)に示すような、螺旋形状（すなわち最初の螺旋一段分12s）が形成された基板11が作製される。つまり、レジストパターン32の厚みが場所により異なるため、エッティングされる量もレジストパターン32の厚みに応じて変化し（すなわち基板11に加えてレジストパターン32もエッティングされるため）、結果としてレジストパターン32の形状（厚み）に応じた形状が基板11上に形成される。ここまでが前半の作製工程Aである。なお、最初の螺旋一段分12sの高さ（厚さ）は、ここでは2dである。最初の螺旋一段分12sの厚さは、レジストパターン32と基板11とのエッティングにおける選択比などにより支配される。ちなみに、最初の螺旋一段分12sは、図1(b)に示すように2次元格子点に配列させるが、図3では便宜上、一つの格子点の最初の螺旋一段分12s（柱状体12）のみを図示する。

【0022】(3) 続いて、この最初の螺旋一段分12sが形成された基板11上に、バイアススパッタにより低屈折率材料部12a（ここでは二酸化珪素、屈折率1.4）と高屈折率材料部12b（ここではシリコン、屈折率3.5）を交互に螺旋一段分ずつ積層する。バイアス

スパッタにおいては、エッティングとデポジションが同時に起こり、両者の寄与の比をバイアスなどのスパッタ条件によって制御することができる。さらに、エッティングとデポジションの角度依存性が異なる性質を利用するなど、スパッタ条件を適当に選ぶことにより始めの基板の初期形状を忠実に保ったまま多層膜を積層することができる。この技術は、自己クローニング技術として知られている（S.Kawakami, Electronics Letter, vol.33, p1260 (1997)）。この予め定めておいた積層条件を用いて、最初の螺旋一段分12sが形成された基板11上に、低屈折率材料部12aを最初の螺旋一段分12sの厚さである2dの半分の厚さdで積層する（図3(d)参照）。積層する際には、最初の螺旋一段分12s以外の平面部にも積層が起こるが、作製される形状がわかりやすいように、各図では平面部の積層は無視して最初の螺旋一段分12s上の積層のみを図示している。

【0023】(4) 次に、低屈折率材料部12aよりなる螺旋一段分の上に、高屈折率材料部12bよりなる螺旋一段分を同じく厚さdで積層する。これにより図3(e)に示す形状が形成される。以降は、図3(d)における螺旋一段分の積層と図3(e)における螺旋一段分の積層を繰り返すことにより、図3(f)のように低屈折率材料部12aよりなる螺旋一段分と高屈折率材料部12bよりなる螺旋一段分がそれぞれ二重螺旋形状につながった構造が作製される。図3(f)では立体構造が少々わかりにくいが、高屈折率材料部12bの部分（つまりシリコン部分）のみを表示すると図2のようになり、高屈折率材料部12bが螺旋形状になっていることがわかる。

【0024】柱状体12を配置する格子は、はじめのリソグラフィによって正方格子、三角格子など自由に変えることができ、正方格子及び三角格子からスタートした柱状体12の配置構造に関してはフルフォトニックバンドギャップが開くことがわかっている。また、任意の格子に対して作製されるフォトニック結晶の構造は、上面から見ると右回りと左回りの対称性が崩れており、人工旋光性を持ちうることは明らかである。また、この第1の作製方法では、構成材料としてシリコンと二酸化珪素を用いたが、バイアススパッタによる形状制御は他の物質においても可能であり、この材料の組み合わせに制限されないことは自明である。

【0025】〔第2の作製方法、図4参照〕第2の作製方法は、フォトニック結晶10を作製する基板11とは異なる他の基板21上に、最初の螺旋一段分12sに相当する螺旋一段形状22sを2次元配列させ、この他の基板21を押し型20として、基板11上に形成された薄膜t_sに押し型20を押し付けることにより最初の螺旋一段分12sを転写する工程A。そして、この工程Aに続いて、屈折率の異なる薄膜t_{a'}、t_{b'}を順次螺旋一段分ずつ積層し、薄膜を一段積層する毎に押し型

20により螺旋一段形状22sを順次転写して柱状体12を2次元配列させる工程Bにより、フォトニック結晶10を作製するものである。なお、このように微細形状の型（モールド）を押し付けて他の材料を同一形状に加工する技術は、一般にナノプリント技術と呼ばれている。

【0026】(1) 先ず、フォトニック結晶10を作製する基板11とは異なる他の基板21（ここではシリコンとなる）に、最初の螺旋一段分12sに相当する螺旋一段形状22sを2次元配列させる。この2次元配列させる方法は、第1の作製方法で説明したのと同様の手段による。つまり、他の基板21上にレジストを塗布し、露光量をレジストの場所によって変化させて露光して、レジストパターンを形成する。その後、このレジストパターンに基づいてドライエッチングを行なうことにより、螺旋一段形状22sが2次元配列される。なお、螺旋一段形状22sの高さ（厚さ）は、ここでは2dである。以後、この螺旋一段形状22sが2次元配列された他の基板21は、押し型20（モールド）として使用される。

【0027】(2) 次に、基板11上にPZT溶液（チタン酸ジルコン酸鉛）を回転塗布（スピンドル）し、この塗膜を熱処理してPZTからなる薄膜t_{s'}（軟らかい薄膜）を基板11上に形成する。この薄膜t_{s'}の厚さは、加熱硬化後の厚さが2dになるようにする。その後、この薄膜t_{s'}に押し型20を押し付けて最初の螺旋一段分12sの形状を転写（刻印）する（図4(a)参照）。形状転写の後、薄膜t_{s'}を加熱（アニール）して硬化させる。これにより薄膜t_{s'}は、屈折率2.6の透明材料となる硬い薄膜t_s（屈折率2.6）になる。この硬化後の薄膜t_sが、特許請求の範囲の記載における最初の螺旋一段分12sになる。

【0028】(3) 続いて、最初の螺旋一段分（図1などにおいて12sで示される）が形成された基板11上に、酸化珪素複合材料塗布液を回転塗布して薄膜t_{a'}（軟らかい薄膜）を形成する。薄膜t_{a'}は、加熱硬化した後の薄膜t_a（硬い）の厚さがdになるように形成される。ちなみに、酸化珪素複合材料塗布液は、押し型20によりあけられた穴の部分（図示外）にも満たされる。薄膜t_{a'}を形成した後、最初の螺旋一段分と同じ位置の上に、押し型20を押し付ける。この際、押圧力を調節して、加熱硬化した後の薄膜t_aの厚さがdになるようにする。これにより、螺旋一段形状22sが転写（刻印）される。そして、薄膜t_{a'}を加熱して硬化させ、二酸化珪素よりなる薄膜t_a（屈折率1.4）とする（図4(b)参照）。この螺旋一段形状22sを転写した薄膜t_aが、特許請求の範囲の記載における低屈折率材料部12aよりなる螺旋一段分になる。

【0029】(4) 今度は、PZT溶液を回転塗布し熱処理してPZTよりなる薄膜t_{b'}（軟らかい薄膜）を形

成する。薄膜t_{b'}は、加熱硬化した後の薄膜t_bの厚さがdになるように形成される。PZT溶液は押し型20によりあけられた穴の部分（図示外）にも満たされる。そして、最初の螺旋一段分と同じ位置の上に（前記(3)での操作によりあけられた穴と同じ位置でもある）、押し型20を押し付ける。この際、押圧力を調節して、加熱硬化した後の塗膜t_bの厚さがdになるようにする。これにより螺旋一段形状22sが転写（刻印）される。そして、薄膜t_{b'}を加熱して硬化させ、PZTよりなる薄膜t_b（屈折率2.6）とする（図4(c)参照）。この螺旋一段形状22sを転写した薄膜t_bが、特許請求の範囲の記載における高屈折率材料部12bよりなる螺旋一段分になる。

【0030】(5) 引続き、前記(3)での操作及び前記(4)での操作を繰り返し、所定段数の薄膜（t_a, t_b）を積み重ねて柱状体12を形成する。

【0031】このように、薄膜t_{a'}, t_{b'}（軟らかい薄膜）を形成した後、押し型20により型押しして形状を転写（刻印）し、これを加熱硬化して順次積層することでも、図1(a)に示す、低屈折率材料部12aと高屈折率材料部12bの同一材料部分が連続的に螺旋状に繋がった柱状体12を2次元配列したフォトニック結晶10を作製することができる。なお、各層の形状転写においては位置合わせが必要であるが、位置合わせにはX線リソグラフィにおけるステッパーの位置合わせ技術を用いることができる。また、パターン深さ（厚さd, 2d）の調整には、ピエゾ電気素子を用いることができる。

【0032】この第2の作製方法では、形状が転写（刻印）される物質としてPZT及び酸化珪素を用いたが、ポリマーや酸化物など一般に刻印により加工可能な材料であれば同じ方法が適用可能であることは自明である。また、押し型20の基板（他の基板21）としてシリコンを用いたが、これも炭化珪素（SiC）など他の材料に置き換えることも可能であり、シリコンには限定されない。さらに、柱状体12を配置する格子は、押し型20によって正方格子、三角格子など自由に変えることができる。

【0033】以上、本発明の実施の形態につき説明したが、本発明は、必ずしも前記した手段及び手法に限定されるものではなく、本発明にいう目的を達成し、本発明にいう効果を有する範囲において適宜に変更実施することが可能である。例えば、本実施の形態においては2種類の材料からフォトニック結晶を作製したが、3種類以上の材料を適当に割り振り順番に積層しても同じような螺旋形状が作製されることは自明である。材料が3種類の場合は、3つの材料部分を足し合わせた厚さ（3つの材料部分よりなる螺旋一段分の厚さ）が、最初の螺旋一段分の厚さと同じになるようにする。逆に、厚みの基準となるのは、光が閉じ込められるコアとなる部分（高屈

折率材料部)であるので、先ずコアとなる部分の厚さを決定し、次に必要なクラッドの厚さを決定し、そして最初の螺旋一段分(押し型の螺旋一段形状)の厚さを決定する手順とすることができます。また、フォトニック結晶の作製方法として、バイアススパッタ技術とナノプリント技術を用いる方法について述べたが、半導体エピタキシャル成長などの他の方法によって、最初の螺旋形状を保存しながら積層を行っても同じ効果が期待できる。

【0034】

【発明の効果】以上説明したように、本発明のフォトニック結晶によれば、フルフォトニックバンドギャップを形成することができ、発光素子や光導波路などに適用できる。また、本発明のフォトニック結晶の構造は、右回りと左回りの対称性が崩れているため、右水晶と左水晶の場合のように旋光性を持ち、直線偏光子として適用できる。また、本発明のフォトニック結晶の作製方法によれば、同一材料部分が連続的に螺旋状に連続的に繋がった柱状体を有するフォトニック結晶を確実に作製することができる。殊に、バイアススパッタ技術あるいはナノプリント技術を適用することで、本発明のフォトニック結晶を確実に作製することができる。また、本発明のフォトニック結晶の作製方法は、請求項1に記載のフォトニック結晶の作製に限定されることなく、他の構造を有するフォトニック結晶を作製する場合にも適用できる。さらに、本発明によれば、最初の螺旋一段分及び押し型を確実に精度よく作製することができる。この押し型は、何度もフォトニック結晶の作製に繰り返して使用することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本実施の形態におけるフォトニック結晶の周期構造などを示す斜視図である。(a)はフォトニック結晶を、(b)は基板上に形成された螺旋一段分を示す。この(b)は押し型を示すものである。

【図2】 本実施の形態におけるフォトニック結晶の螺旋構造を示す正面図である。

【図3】 本実施の形態におけるフォトニック結晶の第1の作製方法を示す斜視図である。(a)は基板とレジストを、(b)は基板上の形成されたレジストパターンを、(c)は最初の螺旋一段分を、(d)は最初の螺旋一段分の上に形成された低屈折率材料部よりなる螺旋一段分を、(e)は(d)の上に形成された高屈折率材料部よりなる螺旋一段分を、(f)は1本の柱状体を示す。

【図4】 本実施の形態におけるフォトニック結晶の第2の作製方法を示す斜視図である。(a)は最初の螺旋一段分を、(b)は(a)の上に形成された低屈折率材料部よりなる螺旋一段分を、(c)は(b)の上に形成された高屈折率材料部よりなる螺旋一段分を、(d)は順次螺旋一段分を積層して行く過程を示す。

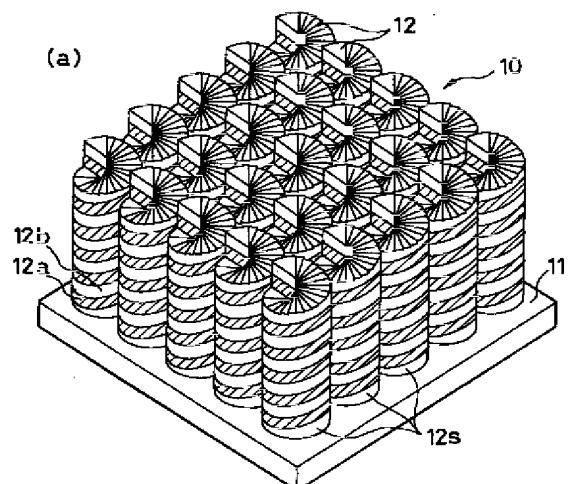
【図5】 従来の方法における3次元フォトニック結晶の構造などを示す模式図である。(a)はドライエッティングによるものを、(b)はマイクロマシン技術によるものを示す。

【図6】 従来の作製方法によって作製されるフォトニック結晶型偏光子の構造を示す模式図である。(a)は板状体を並べたものを、(b)は柱状体を2次元配列したものを示す。

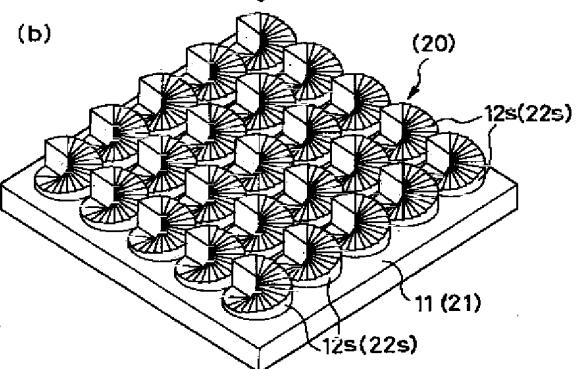
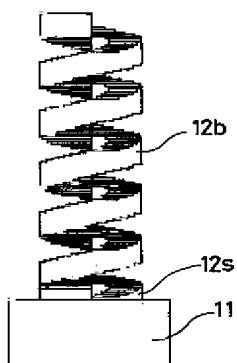
【符号の説明】

10	フォトニック結晶
11	基板
12	柱状体
12a	屈折率の異なる材料(低屈折率材料部)
12b	屈折率の異なる材料(高屈折率材料部)
12s	最初の螺旋一段分
20	押し型
21	他の基板
22s	螺旋一段形状
31	レジスト
32	レジストパターン
t a'	薄膜(低屈折率材料部12aを形成するための薄膜)
t b'	薄膜(高屈折率材料部12bを形成するための薄膜)
t s'	薄膜(最初の螺旋一段分12sを形成するための薄膜)

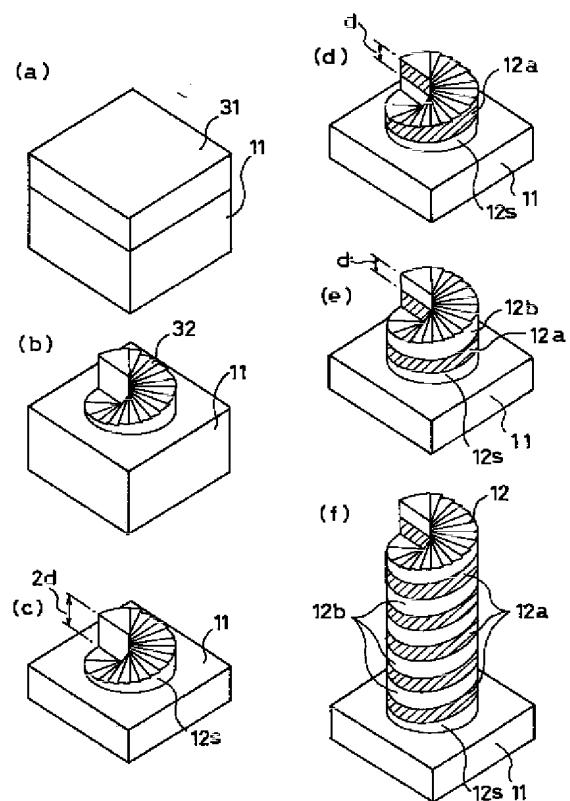
【図1】



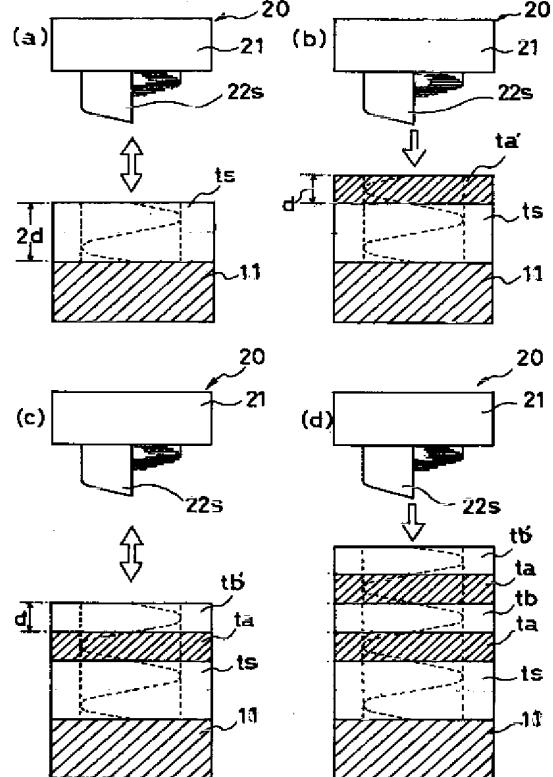
【図2】



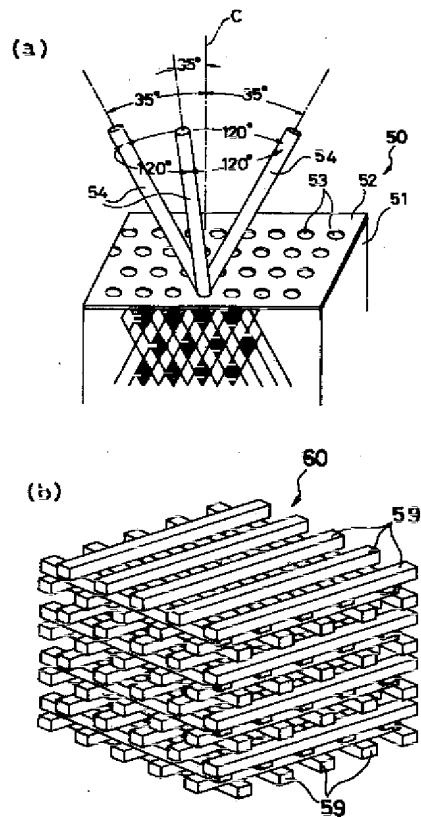
【図3】



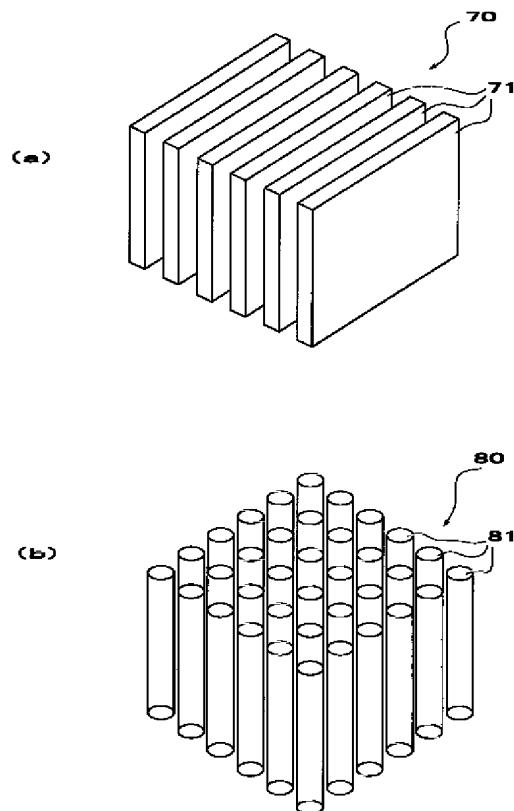
【図4】



【図5】



【図6】



フロントページの続き

(72)発明者 玉村 敏昭

東京都新宿区西新宿三丁目19番2号 日本
電信電話株式会社内

F ターム(参考) 2H047 PA02 PA04 PA22